

Техника обнаружения терагерцевой сигнатуры при помощи идентификации функции размытия точки изображающей системы

Березовский А.А.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 443010, ул. Л.Толстого, 23, Самара, Россия

Аннотация

Доклад содержит новую концепцию обнаружения спектральных пиков поглощения химических веществ, основанную на связи между спектром поглощения и изображением, зарегистрированным матрицей чувствительных к интенсивности сигнала элементов. Исследование показало, что в терагерцевом диапазоне эта связь, существующая за счет наличия эффектов дисперсии и дифракции в собирающей линзе, проявляется в степени, достаточной для создания нового поколения датчиков обнаружения и различения химических веществ, заметно снижающего существующие требования к оборудованию такого типа.

Ключевые слова: терагерцевая спектроскопия; изображающая система; идентификация функции размытия точки; слепая обработка сигналов

1. Введение

Современные исследования, посвященные обнаружению химических веществ в терагерцевом диапазоне содержат уникальные сигнатуры для большинства объектов, обычно участвующих в подобных экспериментах в отношении других методов (таблица 1 в [1]). Именно в этом диапазоне у химических веществ был обнаружен механизм поглощения радиоволн, дающий специфический для каждого вещества набор пиков поглощения и, за счет этого, позволяющий различать образцы по их спектру. В наше время специалисты по безопасности [2, 3] ставят вопрос о возможности практических применений терагерцевой спектроскопии для обнаружения опасных веществ, скрытых внутри писем и посылок, багажа в аэропорту, под одеждой и т. д. В связи с появлением коммерческих терагерцевых спектрометров временного разрешения (terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS) по всему миру были проведены исследования спектра поглощения различных веществ, запрещенных к хранению и распространению а так же похожих на них по спектру, но не представляющих опасности [4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15].

Рассмотрим некоторые устройства, работающие в терагерцевом диапазоне и позволяющие обнаруживать и классифицировать химические вещества. Классическим прибором, позволяющим получить спектральную сигнатуру вещества образца является монохроматор. В исследовании [16] терагерцевое излучение получали при помощи квантово-каскадного лазера (QCL). После частичного поглощения в образце излучение проходит входную щель монохроматора шириной 3 мм, разлагается на спектр в диспергирующем элементе и через выходное отверстие большого размера попадает на массив приемных элементов — микроболометров. Таким образом в этой работе спектральное разрешение многомодового излучения QCL достигается путем использования двумерного массива приемных элементов. Более сложным прибором, позволяющим наблюдать спектральные особенности вещества образца является ТГц Фурье-спектроскоп [17]. В случае измерений в режиме поглощения обычно используется широкополосный источник излучения. В таком приборе, фактически являющимся интерферометром Майкельсона, интерферограмма строится в результате перемещения одного из зеркал с постоянной скоростью а спектр получается при помощи косинусного Фурье преобразования от интерферограммы. Измерение ТГц сигнала во временной области стало возможно благодаря появившимся в последнее время спектрометрам временного разрешения (terahertz time-domain spectroscopy, THz-TDS) [9]. В данном примере фемтосекундный лазер используется для излучения ТГц импульса и для обеспечения когерентного приема ТГц излучения, проходящего через образец и попадающего на кристалл приемника для оптико-электронной дискретизации (electro-optical sampling). Работы, использующие такой тип спектроскопа позволили собрать большое количество спектров поглощения различных веществ. Пример такого спектра можно увидеть на рисунке 2.

Данные устройства до сих пор не являются распространенным решением для практических задач, связанных с обнаружением химических веществ из-за узкой входной щели монохроматора, необходимости подвижного зеркала при фурье-спектрометрии и дороговизны схемы с использованием лазеров в спектрометрах временного разрешения. Таким образом из-за трудностей, связанных с технической реализацией приема и передачи сигналов терагерцовый диапазон до сих пор не задействован ни в одном классическом решении задач радиотехники, имеющих важное практическое значение. В иностранной литературе это эмпирическое наблюдение получило название — "THz gap".

Ситуация, однако может в короткое время измениться если, например, в данном диапазоне будет применена современная техника извлечения информации из терагерцевых изображений, содержащих данные об интенсивности сигнала. При этом могут применены относительно недорогие в производстве и удобные в эксплуатации терагерцевые матрицы, обычно используемые для регистрации изображений в этом диапазоне.

2. Техника извлечения информации о спектре поглощения или отражения из зарегистрированного изображения

Данная работа направлена на разработку имеющего практическую ценность решения задачи идентификации и измерения особенностей спектра поглощения образцов химических веществ в терагерцевом диапазоне. Предлагаемый в ней метод использует тот факт, что изображения веществ, пропускающих различные части спектра в различных пропорциях при регистрации матрицей чувствительных к интенсивности приемников ТГц излучения (например болометров) в результате дисперсии в собирающей линзе будут иметь различные искажения [1]. Эти искажения можно идентифицировать, используя описанный в работе подход для расчета ожидаемых искажений, а также оценить непосредственно по зарегистрированному изображению, используя алгоритм слепой идентификации, например [18]. При этом, за счет применения результатов исследований в области слепой идентификации, обнаружение и классификация образцов при помощи предлагаемого подхода не требуют знания истинного, неискаженного изображения образца.

2.1. Связь спектра поглощения образца с функцией рассеяния точки (ФРТ) его зарегистрированного изображения

На рисунке 1 показана предлагаемая схема формирования изображения, при этом исследуемое вещество расположено так, чтобы можно было зарегистрировать изображение в режиме поглощения. На этом рисунке BB - источник широкополосного терагерцевого излучения. В качестве источника излучения можно использовать, например, излучение человеческого тела в терагерцевом диапазоне, как это было сделано в работах [19, 20], или излучение Солнца. Лучи R попадают на образец S_χ , состоящий целиком из идентифицируемого вещества χ , который, если это одно из изученных в предыдущих работах веществ, описанным ниже образом ослабит определенные компоненты спектра благодаря пикам поглощения. Из закона Бугера—Ламберта—Бера [21, 22] следует что для каждой частоты f спектра источника BB интенсивность излучения будет ослаблена в $e^{\alpha_\chi(f)}$ раз, где $\alpha_\chi(f)$ - Спектр поглощения изучаемого вещества χ . Получившиеся, "окрашенные" таким образом лучи R_c со спектром $g_\chi(f) \propto e^{-\alpha_\chi(f)}$, фокусируются линзой L на матрицу чувствительных к интенсивности излучения элементов M , например болометров.

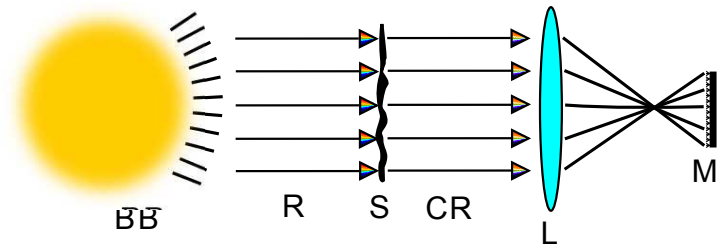


Рис. 1. Регистрация изображения наблюдаемого образца.

Из-за дифракционных ограничений, а так же благодаря дисперсии в линзе L , изображение y_χ будет, очевидно, результатом свертки некой ФРТ $h_\chi(l_1, l_2)$, зависящей от выбора материала χ просвечиваемого образца, и неизвестного, неискаженного изображения $x_\chi(m_1, m_2)$:

$$y_\chi(m_1, m_2) = \int_0^{L_1} \int_0^{L_2} x_\chi(m_1 - l_1, m_2 - l_2) h_\chi(l_1, l_2) dl_1 dl_2 + n(m_1, m_2), \quad (1)$$

где l_1, l_2, m_1, m_2 - пространственные координаты, $n(m_1, m_2)$ — аддитивный шум, L_1, L_2 — размеры ФРТ.

Ниже будет показано как связаны ФРТ $h_\chi(l_1, l_2)$ и спектр поглощения $\alpha_\chi(f)$ для произвольного вещества χ и предложен способ идентификации вещества χ только по зарегистрированному сенсором изображению y_χ .

При исследовании образца S_χ , состоящего из вещества χ на каждой частоте излучение будет ослаблено согласно спектру поглощения этого вещества. Вследствие некогерентности волн различных частот результирующая ФРТ $h_\chi(l_1, l_2)$ будет определяться следующим выражением:

$$h_\chi(l_1, l_2) = \int_{f_1}^{f_2} g_\chi(f) h(f, l_1, l_2) df, \quad (2)$$

где f_1 и f_2 - границы полосы чувствительности сенсора.

Из оптики [21] известно, что для сфокусированной оптической системы функция размытия точки $h(f, l_1, l_2)$ будет представлять собой диск Эйри. В общем случае ФРТ при дефокусировке, с учетом законов физической оптики, описывается, согласно [23, 24, 25, 26], при помощи одномерной оптической передаточной функции $H(u, \Delta)$. Перепишем выражение для $H(u, \Delta)$, полученное в процитированных выше работах для некоторой частоты излучения f :

$$H(f, u) = \frac{4}{\pi} \int_u^1 (1 - x^2)^{1/2} \cos[2\pi u(x - u)\Delta(f)] dx. \quad (3)$$

В формуле (3) $\Delta(f)$ - характеристика размера дефокусировки, широко используемая в работах [24, 25, 26]:

$$\Delta(f) = \frac{4f}{c} \frac{(\frac{D}{2})^2 Z(f)}{2F(f)(F(f) + Z(f))}, \quad (4)$$

где, $Z(f) = v(f) - v(f_0)$.

Тогда, согласно [25, 26] можно записать функцию рассеяния точки от одной координаты τ следующим образом:

$$h(f, \tau) = 2\pi \int_0^\infty H(f, u, \Delta) J_0(2\pi u \tau) u du, \quad (5)$$

Расстояние r до центра размытия связано с пространственной координатой τ при помощи формулы $r = \frac{\lambda \tau F(\lambda)}{D}$.

Окончательно, для функции рассеяния точки h_χ изображения $y_\chi(m_1, m_2)$ образца S_χ , состоящего из химического вещества χ со спектром поглощения $\alpha_\chi(f)$ можно записать выражение:

$$h_\chi(r) = \int_{f_1}^{f_2} e^{-\alpha_\chi(f)} h(f, r) df \quad (6)$$

2.2. Пример моделирования ФРТ для известной оптической системы и образца с известным спектром поглощения

Предположим, что линза L является тонкой линзой. Тогда для нее справедлива следующая формула [21]:

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v(f)} = \frac{1}{F(f)}, \quad (7)$$

$F(f)$ - фокусное расстояние линзы.

А так же известно [21] выражение для зависимости $F(f)$:

$$\frac{1}{F(f)} = (n(f) - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n(f) - 1)d}{nR_1R_2} \right), \quad (8)$$

где $n(f)$ - показатель преломления вещества линзы, зависящий от длин волны излучения, R_1 и R_2 - радиусы кривизны линзы, d - толщина линзы на оптической оси.

Зависимость $n(f)$ можно аппроксимировать при помощи уравнения Коши [27]:

$$n(\lambda) = B + \frac{C}{\lambda^2} + \frac{D}{\lambda^4} + \dots, \quad (9)$$

где $\lambda = \frac{c}{f}$ - длина волны в вакууме, B, C, D, \dots - константы, которые можно определить зная для линзы коэффициенты преломления $n(\lambda_i)$ на некоторых длинах волн λ_i .

Предположив, что в диапазоне частот от $f_1 = 0.5 \text{ ТГц}$ до $f_2 = 3 \text{ ТГц}$ коэффициент преломления $n(f)$ линзы L меняется на 20%, можно оценить коэффициенты в уравнении Коши: $C = \frac{n(f_2) - n(f_1)}{(f_2/c)^2 - (f_1/c)^2} = 2.88 \cdot 10^9$, $B = n(f_2) - \frac{Cf_2^2}{c^2} = 1.392$ и смоделировать ФРТ для образца S_1 , состоящего из химического вещества с известным спектром поглощения $\alpha_1(f)$.

Расчет ФРТ можно использовать при решении задачи обнаружения. Для этого предлагается использовать частоты фокусировки, совпадающие с частотами пиков поглощения образца. Рассмотрим, например, образец состоящий из вещества со спектром, изображенным на рис. 2. Его пики поглощения располагаются, согласно [8] на длинах волн 0.137 0.187 и 0.263 мм. На рисунке 3 приведены ФРТ для расстояний от линзы до матрицы, соответствующими сфокусированным изображениям в пиках поглощения тринитротолуола. Данный выбор расстояний между линзой и матрицей обусловлен тем, что сфокусированная оптическая система имеет более узкую ФРТ чем расфокусированная. Расположение пиков поглощения на частотах фокусировки образца позволяют уменьшить вклад ФРТ, близких к диску Эйри в интеграле (6), что дает заметное для описанного ниже алгоритма обнаружения отличие ФРТ различных образцов. В моделировании образец S_1 состоял из вещества с равномерным спектром поглощения а образец S_2 - из вещества со спектром поглощения, изображенным на рис. 2.

Таблица 1 — Параметры линзы

$F(0.5 \text{ ТГц})$	100 мм
R_1	40 мм
D	50 мм
$n(0.5 \text{ ТГц})$	1.4

2.3. Обнаружение сигнатуры химического вещества при помощи идентификации функции размытия точки терагерцевого изображения этого вещества

При помощи полученных ранее ФРТ можно описать искажения для некоторого неизвестного изображения x . Для $y_\chi^1, y_\chi^2, y_\chi^3$, результатов свертки(1) некоторого изображения x_χ с каждой из ФРТ $h_\chi^1, h_\chi^2, h_\chi^3$ можно идентифицировать спектр поглощения $\alpha(f)$ если, например, поставить задачу обнаружения.

Тогда, в случае равной вероятности присутствия и отсутствия искомого вещества на неизвестном изображении x решающее правило, позволяющее принять решение о том, какими ФРТ $h_\chi^1, h_\chi^2, h_\chi^3$ или $h_\chi^1, h_\chi^2, h_\chi^3$ искажены зарегистрированные изображения $y_\chi^1, y_\chi^2, y_\chi^3$ и таким образом, учитывая полученную выше связь искажений и спектра поглощения, сделать вывод о том, какой из образцов S_1 или S_2 присутствует на снимке, очевидно имеет вид:

$$J(y_\chi^1, y_\chi^2, y_\chi^3 | h_\chi^1, h_\chi^2, h_\chi^3) \underset{S_2}{\overset{S_1}{\leq}} J(y_\chi^1, y_\chi^2, y_\chi^3 | h_\chi^1, h_\chi^2, h_\chi^3). \quad (10)$$

Здесь в качестве J используется функционал, известный как метод взаимных отношений. Данный функционал реализует метод наименьших квадратов для задачи идентификации неизвестных искажений по результату свертки 1 и обычно используется в работах по восстановлению изображений и сигналов [28, 29]:

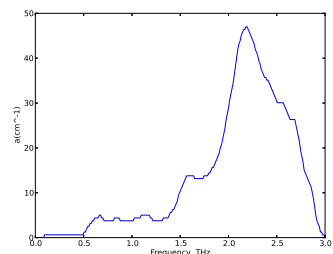


Рис. 2. Спектр поглощения тринитротолуола [8], использовавшийся при моделировании.

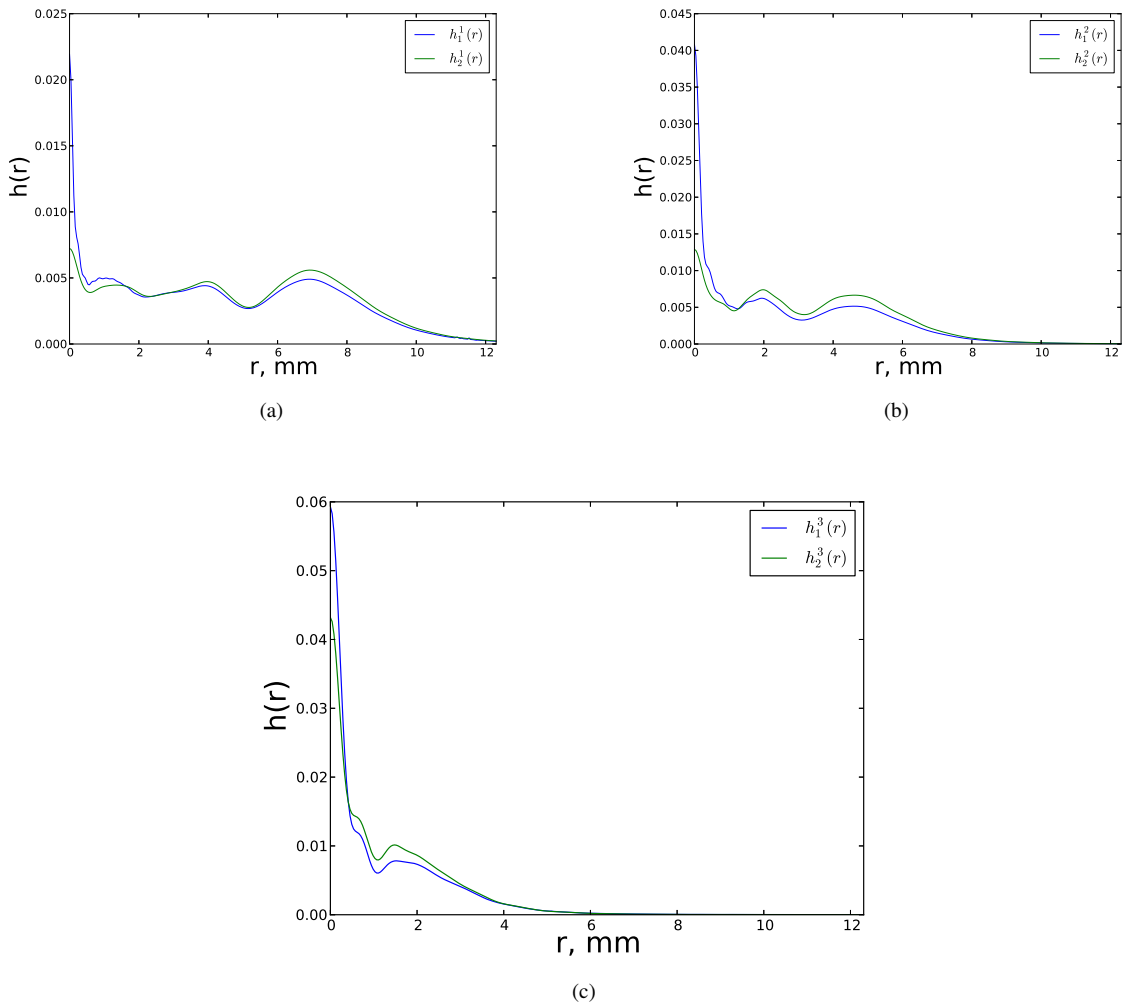


Рис. 3. ФРТ от центра размытия для образцов S_1 (синий цвет) и S_2 (зеленый цвет) при расстояниях линзы до матрицы 89, 116 и 140.5 мм - (a): h_1^1, h_2^1 , (b): h_1^2, h_2^2 (c): h_1^3, h_2^3

$$J(y_\chi^1, y_\chi^2, y_\chi^3 | h^1, h^2, h^3) = \sum_{i,j} \sum_f |Y_\chi^i H^j - Y_\chi^j H^i|^2, \quad (11)$$

где заглавные буквы означают соответствующие преобразования Фурье.

При неравных априорных вероятностях присутствия веществ S_1 и S_2 на изображении x_χ правило (10) будет справедливо с точностью до некоторого порога:

$$\frac{J(y_\chi^1, y_\chi^2, y_\chi^3 | h_1^1, h_1^2, h_1^3) S_1}{J(y_\chi^1, y_\chi^2, y_\chi^3 | h_2^1, h_2^2, h_2^3) S_2} \leq \Theta. \quad (12)$$

В моделировании алгоритм принятия решения 12, полагая неизвестным изображение x_χ , по зарегистрированным изображениям $y_\chi^1, y_\chi^2, y_\chi^3$, при различных уровнях аддитивного шума обнаруживал какой образец S_χ из двух, участвующих в моделировании образцов со спектром поглощения α_1 или α_2 , является причиной для зарегистрированных изображений. Рабочая характеристика приемника (ROC-кривая), широко используемая для оценки методов обнаружения химических веществ (см., например [3, 30]), была получена изменением порога Θ . Моделирование проводилось с использованием ФРТ (рис. 3). Для этого плотность пикселей ТГц матрицы была принята равной 2 пикселя на сантиметр. Таким образом на ФРТ как на изображение точечного объекта в описываемом эксперименте приходилась область 5 на 5 пикселей. Изменения значений ФРТ в области одного пикселя были усреднены с целью смоделировать суммирование энергии на каждом приемном элементе внутри его диаграммы направленности. Эти ФРТ изображены на рис. 4.

В качестве истинного ТГц изображения x_χ было использовано случайное неотрицательное изображение, показанное на рисунке 5(a). Искаженные изображения y_1^1 (рисунк 5(b)), y_1^2 (рис. 5(c)), y_1^3 (рис. 5(d)), благодаря ядрам свертки h_1^i содержащие некоторую информацию о плоском спектре поглощения образца S_1 , и искаженные сверткой с h_2^i изображения y_2^1 (рис. 5(e)), y_2^2 (рис. 5(f)), y_2^3 (рис. 5(g)), содержащие, как это было показано выше, информацию о спектре поглощения образца S_2 (рис. 2) при моделировании имели размеры 24 на 24 пикселя, что при выбранной плотности пикселей соответствует физическим размерам матрицы 118 на 118 мм. Зарегистрированные изображения были зашумлены при различных коэффициентах отношения сигнал/шум $SNR = 10 \log_{10} \frac{P(x)}{\text{Var}(n_i^f)}$, где n_i^f - реализация положительного белого гауссовского шума. Для 200 значений порога Θ между 0.64 и 0.85 было смоделировано 5000 испытаний для каждого соотношения

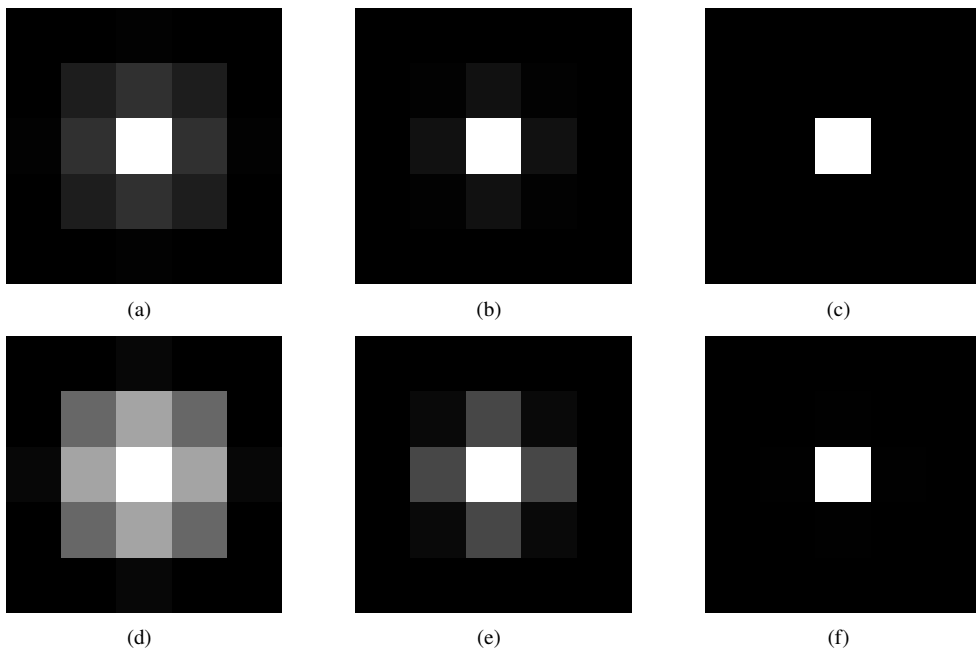


Рис. 4. Усредненные ФРТ для образца S_1 (верхний ряд) - (a): h_1^1 , (b): h_1^2 , (c): h_1^3 ; ФРТ для образца S_2 (нижний ряд) - (d): h_2^1 , (e): h_2^2 , (f): h_2^3 .

сигнал/шум, что позволило построить график зависимости вероятности правильного обнаружения от вероятности ложной тревоги 5(h).

2.4. Применение алгоритмов идентификации функции размытия точки изображений для извлечения информации о спектре поглощения образца

Задачей слепой идентификации изображений является оценка двумерной импульсной характеристики (ИХ, функция размытия точки, ФРТ) по искаженному изображению в условиях аддитивного шума. То есть, в классической постановке задачи, требуется найти ядро h дискретной свертки (13) по результату y , при условии неизвестного истинного изображения x .

$$y_{t_1, t_2} = \sum_{l_1} \sum_{l_2} x_{t_1 - l_1, t_2 - l_2} h_{l_1, l_2} + n_{t_1, t_2}, \quad (13)$$

Попытки восстановить изображение x по результату свертки y известны в литературе как слепая деконволюция [31]. Задача слепой деконволюции может быть решена и при помощи алгоритмов, оценивающих x и h одновременно, и при использовании оценки h , полученной в результате работы алгоритма слепой идентификации, и последующей оценке изображения x алгоритмом обращения свертки с известным ядром, что было неоднократно отмечено в различной литературе [32].

Тривиальное решение уравнения (13) $h_{l_1, l_2} = \delta[l_1, l_2]$, $x_{t_1, t_2} = y_{t_1, t_2}$ называют δ -решением и исключают из рассмотрения. Интуитивно кажется что невозможно обращение свертки (13) без знания ядра свертки h . Однако при наложении определенных ограничений на изображение x и ядро h оказалось возможным построение алгоритмов оценки. Оказалось что результат свертки (13) при представлении x и h в виде полиномов от двух переменных в отсутствии шумов почти всегда факторизуется единственным образом. Один из первых алгоритмов слепого обращения свертки (13), основанный на этой особенности полиномов от двух и более переменных был предложен в работе [33], также важный вклад в это направление внесли многие российские и зарубежные исследователи (см. обзор [34]).

В результате попыток улучшить качество решения при высоких уровнях шума за счет учета априорной информации об истинном изображении в дальнейших исследованиях широкое распространение получила техника слепой идентификации, основанная на использовании эмпирических моделей случайного процесса $p(x)$, реализацией которого является восстанавливаемое изображение x [35, 36]. В более поздних работах [37, 32, 38] удалось показать, что сам алгоритм оценки x и h влияет на результат сильнее чем дальнейшее повышение точности описания распределения $p(x)$. Успех работ в данном направлении подтвержден тем, что принадлежащие к данному классу алгоритмы были реализованы в нескольких коммерческих и свободно распространяемых программных продуктах. Тем не менее серьезные ограничения на изображение x сохраняются и в этих работах как следствие самой постановки задачи обращения свертки (13).

Существует также постановка задачи слепой идентификации при которой возможно построение обладающих высокой помехоустойчивостью алгоритмов без использования ограничений на распределение $p(x)$. Это становится возможным, если зарегистрировано M изображений $y^1, y^2, \dots, y^i, \dots, y^M$, являющихся результатом свертки одного и того же изображения x с M различными ФРТ $h^1, h^2, \dots, h^i, \dots, h^M$, $M > 1$:

$$y_{t_1, t_2}^i = \sum_{l_1} \sum_{l_2} x_{t_1 - l_1, t_2 - l_2} h_{l_1, l_2}^i + n_{t_1, t_2}^i \quad (14)$$

Задача обращения свертки (14) с целью оценки ФРТ $h^1, h^2, \dots, h^i, \dots, h^M$ (и истинного изображения x) по известным изображениям $y^1, y^2, \dots, y^i, \dots, y^M$ получила название векторной или многоканальной слепой идентификации (деконволюции). Точное решение этой задачи для незашумленного сигнала, стабильное в условиях шума и являющееся обобщением на двумерный случай одномерного алгоритма EVAM [39] было опубликовано в работе [28]. Этот способ и его модификации (например [40]) позволяют найти решение минимизируя критерий, известный в слепой идентификации одномерных

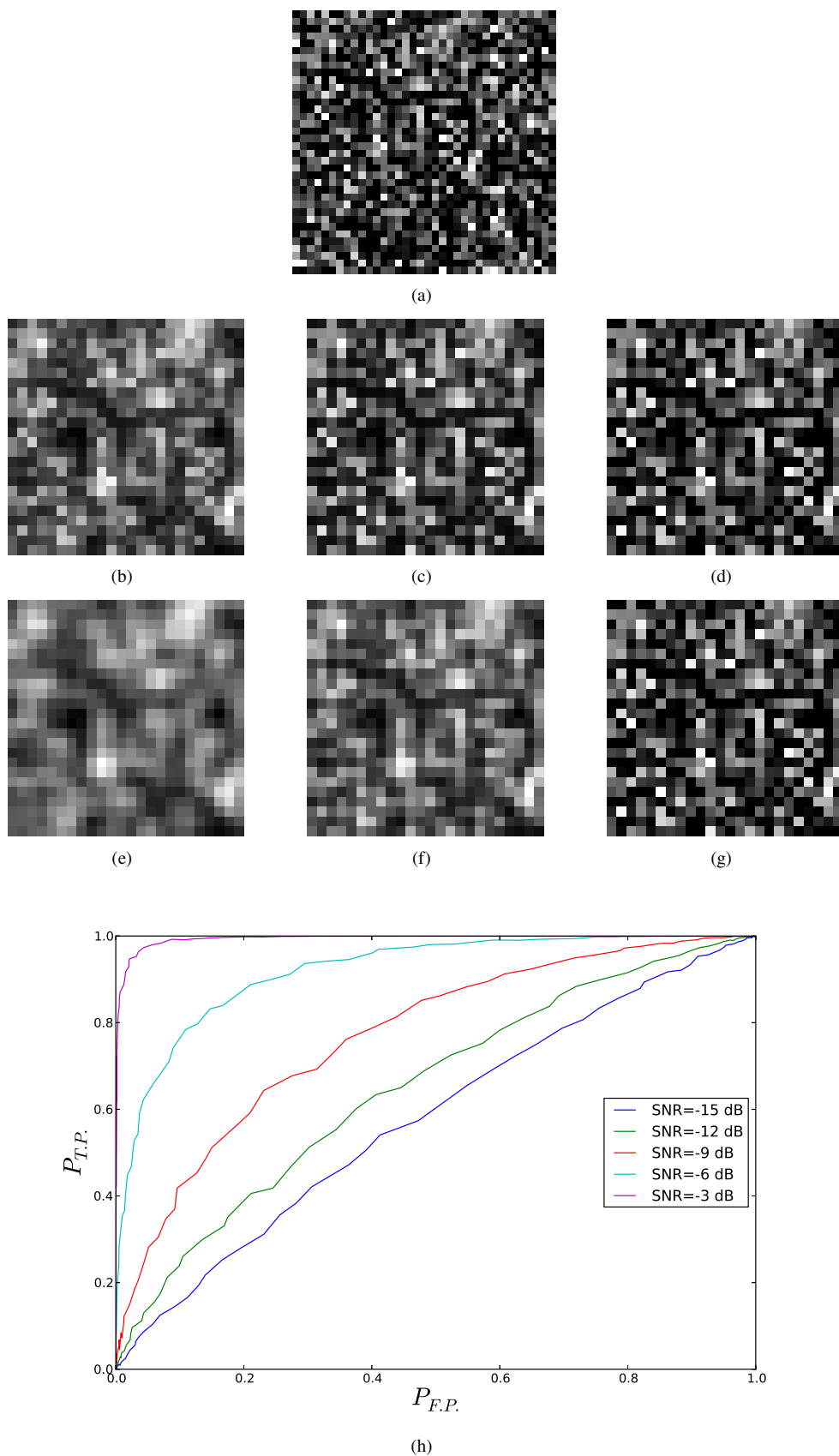


Рис. 5. Исходные данные и результаты моделирования обнаружения образца. (а): изображение x_χ для которого применялись ФРТ с рис. 4; (b)-(d): искаженные изображения, полученные линейной двумерной сверткой изображения x_χ с ФРТ h_1^i ; (e)-(g): искаженные изображения для ядер h_2^i ; (h): рабочая характеристика приемника, полученная в результате моделирования.

сигналов, благодаря статье [29], как Cross Relation Approach а в отечественной литературе получивший название метода взаимных отношений. Попытки улучшить качество решения для высоких уровней шума путем использования различных операторов регуляризации совместно с данным критерием обычно приводят к решению в результате итерационного процесса [41, 42].

В данной работе алгоритмы слепой идентификации применены для идентификации изображений, зарегистрированных оптической системой 1, что, учитывая установленную в работе связь между ФРТ и спектром поглощения, делает ТГц матрицы, чувствительные к интенсивности сигнала, средством измерения особенностей неизвестного спектра поглощения химических веществ. Слепые оценки ФРТ, для различных образцов S_χ могут быть перенесены в пространство принципиальных компонент аналогично тому как результаты работы устройств регистрации химических веществ [43] и результаты измерений при помощи спектроскопии [44] были ранее представлены на плоскости принципиальных компонент с целью показать разницу между различными наборами измеренных данных.

Для иллюстрации применения алгоритмов слепой идентификации с целью извлечения информации о спектре поглощения химических веществ были получены слепые оценки ФРТ. Итерационному алгоритму [18], как более помехоустойчивому из исследованных, были поданы на вход взятые из эксперимента в разделе 2.3 искаженные изображения 5(e), 5(f), 5(g) и 5(b), 5(c), 5(d). 20 слепых оценок \hat{h}_1^i (для первого набора изображений, y_1) и \hat{h}_2^i (для второго набора изображений, y_2) на рис. 6 показаны в плоскости первых двух принципиальных компонент при различных соотношениях сигнал-шум

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{P(y_1)}{Var(n_1^i)}.$$

Большой разброс оценок \hat{h}_1^i , полученных слепой идентификацией изображений y_1 (рис. 5(b), 5(c) и 5(d)) объясняется тем, что ставшие причиной искажений для этих изображений и оцениваемые вслепую ФРТ h_1^i (рис. 4(a)-4(c)) из-за плоского спектра поглощения вещества S_1 сформированы, в основном, узким диском Эйри и близкими к нему размытиями, что делает их близкими к δ -функциям а попытки идентифицировать их вслепую - менее успешными. Напротив, ФРТ \hat{h}_2^i (рис. 4(a)-4(c)) для изображений y_2 (рис. 5(e), 5(f) и 5(g)), смоделированных для соответствующих пикам поглощения образца S_2 расстояний от матрицы до линзы, содержат минимально возможный для данного образца вклад узких, близких к диску Эйри функций размытия для одной частоты и далеко отстоят от δ -функций, что снижает дисперсию оценок \hat{h}_2^i .

3. Заключение

- Метод расчета ФРТ для известной оптической системы без aberrаций, изложенный в работе, позволяет положительно судить о возможностях обнаружения образцов с известным спектром поглощения по зарегистрированным изображениям.
- Моделирование с использованием спектра поглощения тринитротолуола позволяет утверждать на основании полученных операторских кривых 5(h), что обнаружение образцов с известным спектром поглощения при помощи предложенного подхода может иметь практическую ценность и позволяет снизить требования к источникам сигнала или приемным элементам по сравнению с известными подходами или же улучшить положение рабочей характеристики обнаружения по сравнению с подходом [16].
- Для случая, когда спектр поглощения или параметры оптической системы неизвестны, а так же для экспериментальной проверки полученной модели, показана возможность использования алгоритмов слепой идентификации, позволяющих оценивать ФРТ h_χ^i непосредственно по зарегистрированным изображениям y_χ^i , без знания истинного изображения x_χ . Для примера работы алгоритмов слепой идентификации изображений, направленной на решение этой задачи по смоделированным для известной оптической системы изображениям были, без знания истинного изображения и спектра поглощения, оценены ФРТ и представлены на плоскости принципиальных компонент на рис. 6.

Литература

- [1] Березовский. Идентификация функции размытия точки в задаче обнаружения сигнатур химических веществ в терагерцевом диапазоне [Text] / Березовский // Инфокоммуникационные технологии. — 2015. — Vol. 13, no. 2. — P. 196–205.
- [2] Kemp, M. C. Explosives Detection by Terahertz Spectroscopy — A Bridge Too Far? [Text] / M. C. Kemp // Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on. — 2011. — Vol. 1, no. 1. — P. 282–292. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/tthz.2011.2159647>.
- [3] Existing and Potential Standoff Explosives Detection Techniques (Board on Chemical Sciences and Tech./Division on Earth and L) [Text] / Committee on the Review of Existing, Potential Standoff Explosives Detection Techniques, Board on Chemical Sciences [et al.]. — [S. l.] : National Academies Press, 2004. — may. — ISBN: 0309091306. — URL: <http://www.worldcat.org/isbn/0309091306>.
- [4] Security applications of terahertz technology [Text] / Michael C. Kemp, P. F. Taday, Bryan E. Cole [et al.] // AeroSense 2003. — Vol. 5070. — [S. l.] : The International Society for Optical Engineering., 2003. — aug. — P. 44–52. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.500491>.
- [5] Hidden object detection: security applications of terahertz technology [Text] / William R. Tribe, David A. Newnham, Philip F. Taday, Michael C. Kemp. — Vol. 5354. — [S. l.] : s. n., 2004. — P. 168–176. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.543049>.
- [6] Through container THz sensing: applications for explosives screening [Text] / D. J. Cook, B. K. Decker, G. Maislin, M. G. Allen // Terahertz and Gigahertz Electronics and Photonics III / Ed. by R. J. Hwu. — Vol. 5354 of Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series. — [S. l.] : s. n., 2004. — apr. — P. 55–62. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.525466>.
- [7] McLeod, R. R. Vector Fourier optics of anisotropic materials [Text] / Robert R. McLeod, Kelvin H. Wagner // Opt. Express. — 2015. — Vol. 23, no. 9. — P. 11250–11263. — URL: <http://dx.doi.org/>.
- [8] Absorption coefficients of selected explosives and related compounds in the range of 0.1–2.8 THz [Text] / Jian Chen, Yunqing Chen, Hongwei Zhao [et al.] // Opt. Express. — 2007. — Vol. 15, no. 19. — P. 12060–12067. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/oe.15.012060>.
- [9] Terahertz spectroscopy of explosives and drugs [Text] / A. Giles Davies, Andrew D. Burnett, Wenhui Fan [et al.] // Materials Today. — 2008. — mar. — Vol. 11, no. 3. — P. 18–26. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/s1369-7021\(08\)70016-6](http://dx.doi.org/10.1016/s1369-7021(08)70016-6).

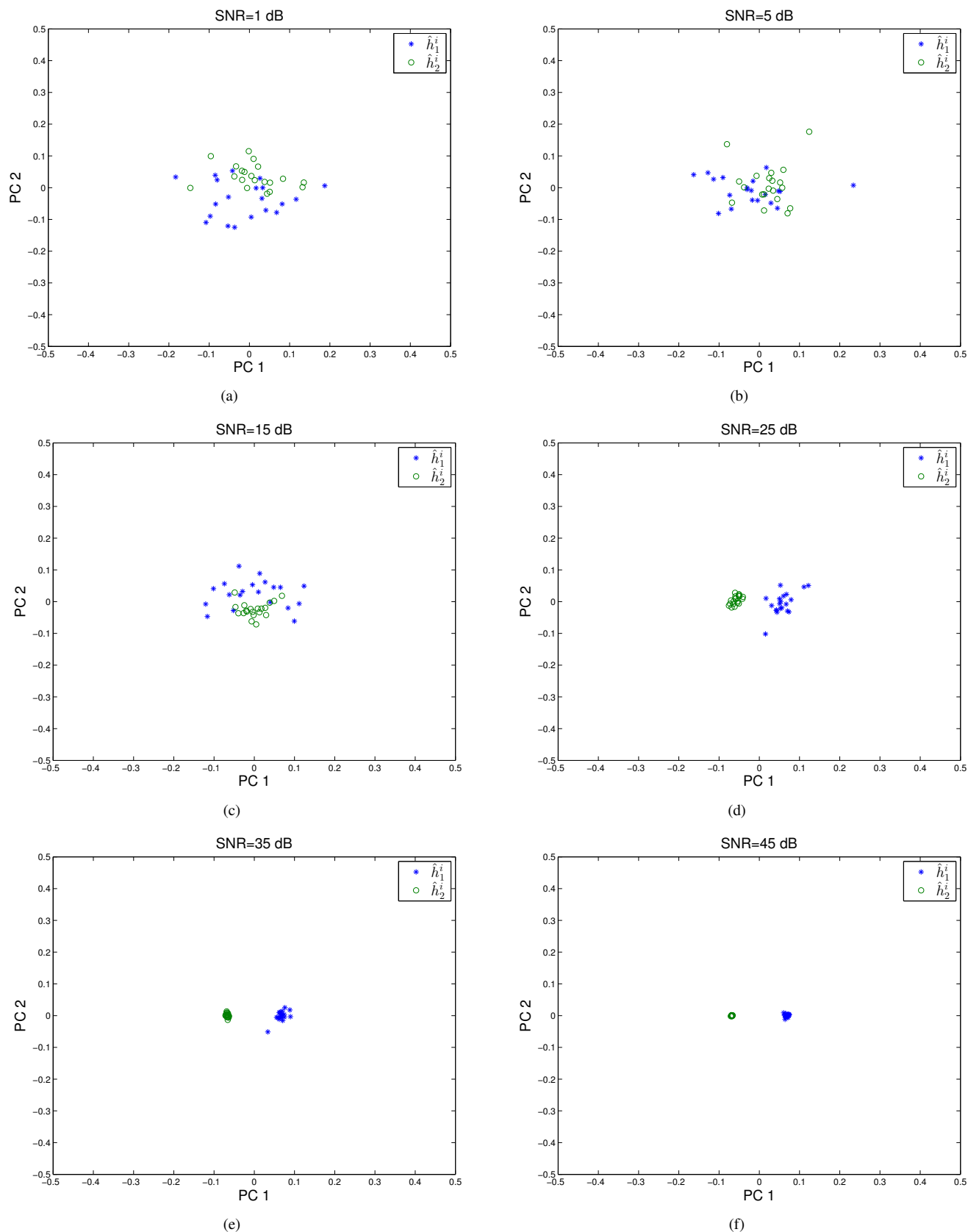


Рис. 6. Результаты слепой идентификации на плоскости принциальных компонент. * - слепые оценки ФРТ, полученные из искаженных изображений 5(b), 5(c), 5(d); о - слепые оценки ФРТ, полученные из изображений, искаженных расчетной для тринитротолуола функцией размытия 5(e), 5(f), 5(g).

- [10] Terahertz wave reference-free phase imaging for identification of explosives [Text] / LiangLiang Zhang, Hua Zhong, Chao Deng [et al.] // Applied Physics Letters. — 2008. — mar. — Vol. 92, no. 9. — P. 091117–091117–3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2891082>.
- [11] A high signal-to-noise ratio, coherent, frequency-domain THz spectrometer employed to characterize explosive compounds [Text] / J. R. Demers, R. T. Logan, N. J. Bergeron, E. R. Brown // Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2008. IRMMW-THz 2008. 33rd International Conference on. — [S. l.] : IEEE, 2008. — P. 1–3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/icimw.2008.4665534>.
- [12] Terahertz absorption spectrum of triacetone triperoxide (TATP) [Text] / John Wilkinson, Christopher T. Konek, Jesse S. Moran [et al.] // Chemical Physics Letters. — 2009. — aug. — Vol. 478, no. 4-6. — P. 172–174. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cplett.2009.07.079>.
- [13] Trzcinski, T. THz spectroscopy of explosive-related simulants and oxidizers [Text] / T. Trzcinski, N. Palka, M. Szustakowski // Bulletin of the Polish Academy

- of Sciences: Technical Sciences. — 2011. — jan. — Vol. 59, no. 4. — P. 445–447. — URL: <http://dx.doi.org/10.2478/v10175-011-0056-4>.
- [14] Palka, N. Identification of concealed materials, including explosives, by terahertz reflection spectroscopy [Text] / Norbert Palka // *Optical Engineering*. — 2013. — Vol. 53, no. 3. — P. 031202. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/1.oe.53.3.031202>.
- [15] Experimental Explosive Characterization for Counterterrorist Investigation [Text] / D. Etayo, I. Maestrojua, J. Teniente [et al.]. — 2013. — Vol. 34, no. 7-8. — P. 468–479. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10762-013-9988-0>.
- [16] Multi-channel terahertz grating spectrometer with quantum-cascade laser and microbolometer array [Text] / R Eichholz, H Richter, SG Pavlov [et al.] // *Applied Physics Letters*. — 2011. — Vol. 99, no. 14. — P. 141112.
- [17] Super-resolution spectroscopy by compact representation [Text] / Pavel Sidorenko, Eli Osherovich, Yoav Shechtman [et al.] // *Frontiers in Optics / Optical Society of America*. — [S. l. : s. n.], 2012. — P. FM3F-5.
- [18] Berezovskiy, A. A. Multichannel image blind deconvolution algorithm [Text] / Andrey A. Berezovskiy, Oleg V. Goryachkin // *Proc. SPIE*. — 2012. — Vol. 8410. — P. 84100J–84100J-4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.927392>.
- [19] THz Imaging Radar for Standoff Personnel Screening [Text] / K. B. Cooper, R. J. Dengler, N. Llombart [et al.] // *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*. — 2011. — Vol. 1, no. 1. — P. 169–182. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ths.2011.2159556>.
- [20] Passive stand-off terahertz imaging with 1 hertz frame rate [Text] / T. May, G. Zieger, S. Anders [et al.]. — Vol. 6949. — [S. l. : s. n.], 2008. — P. 69490C–69490C-8. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.777952>.
- [21] Hecht, E. Optics [Text] / E. Hecht. — [S. l.] : Addison-Wesley, 2002. — URL: <http://books.google.ru/books?id=7aG6QgAACAAJ>.
- [22] Bohren, C. F. Absorption and Scattering of Light by Small Particles [Text] / Craig F. Bohren, Donald R. Huffman ; Ed. by Craig F. Bohren, Donald R. Huffman. — Weinheim, Germany : Wiley-VCH Verlag GmbH, 1998. — apr. — ISBN: 9783527618156. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/9783527618156>.
- [23] Hopkins, H. H. The Frequency Response of a Defocused Optical System [Text] / H. H. Hopkins // *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. — 1955. — jul. — Vol. 231, no. 1184. — P. 91–103. — URL: <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1955.0158>.
- [24] Stokseth, P. A. Properties of a Defocused Optical System [Text] / Per A. Stokseth // *J. Opt. Soc. Am.* — 1969. — oct. — Vol. 59, no. 10. — P. 1314–1321. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/josa.59.001314>.
- [25] Lee, H.-C. Review of image-blur models in a photographic system using the principles of optics [Text] / Hsien-Che Lee // *Optical Engineering*. — 1990. — Vol. 29, no. 5. — P. 405–421. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.55609>.
- [26] Savakis, A. E. On the accuracy of PSF representation in image restoration [Text] / A. E. Savakis, H. J. Trussell // *Image Processing, IEEE Transactions on*. — 1993. — apr. — Vol. 2, no. 2. — P. 252–259. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/83.217229>.
- [27] Jenkins, F. A. Fundamentals of optics [Text] / Francis A. Jenkins, Harvey E. White, Francis A. Jenkins. — [S. l.] : McGraw-Hill, 1976. — ISBN: 0070323305. — URL: <http://www.worldcat.org/isbn/0070323305>.
- [28] Harikumar, G. Perfect blind restoration of images blurred by multiple filters: theory and efficient algorithms [Text] / Gopal Harikumar, Yoram Bresler // *Image Processing, IEEE Transactions on*. — 1999. — feb. — Vol. 8, no. 2. — P. 202–219. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/83.743855>.
- [29] Hua, Y. Fast maximum likelihood for blind identification of blind identification of multiple FIR channels [Text] / Y. Hua // *IEEE Transactions on Signal Processing*. — 1996. — mar. — Vol. 44. — P. 661–672.
- [30] Dubroca, T. The limit of detection for explosives in spectroscopic differential reflectometry [Text] / Thierry Dubroca, Karthik Vishwanathan, Rolf E. Hummel. — Vol. 8018. — [S. l. : s. n.], 2011. — P. 80181L–80181L-7. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.884154>.
- [31] Goryachkin, O. V. Metody slepoj obrabotki signalov i ih prilozheniya v sistemah radiotekhniki i svyazi [Text] / O. V. Goryachkin. — Moscow : Radio i svjaz, 2003.
- [32] Understanding and evaluating blind deconvolution algorithms [Text] / A. Levin, Yael Weiss, Frederic Durand, William T. Freeman // *Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on*. — [S. l.] : IEEE, 2009. — jun. — P. 1964–1971. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/cvpr.2009.5206815>.
- [33] Lane, R. G. Automatic multidimensional deconvolution [Text] / R. G. Lane, R. H. T. Bates // *Journal of the Optical Society of America A*. — 1987. — jan. — Vol. 4, no. 1. — P. 180+. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/josaa.4.000180>.
- [34] Восстановление многомерных сигналов по амплитудному спектру [Text] / ВП Бакалов, ОБ Киреев, ЮЮ Мартюшев, ОИ Матвеева // *Зарубежная радиоэлектроника*. — 1994. — no. 2. — P. 31–37.
- [35] Levin, A. Blind motion deblurring using image statistics [Text] / Anat Levin // *Advances in Neural Information Processing Systems*. — [S. l. : s. n.], 2006. — P. 841–848.
- [36] Removing camera shake from a single photograph [Text] / Rob Fergus, Barun Singh, Aaron Hertzmann [et al.] // *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. — 2006. — Vol. 25, no. 3. — P. 787–794.
- [37] Shan, Q. High-quality motion deblurring from a single image [Text] / Qi Shan, Jiaya Jia, Aseem Agarwala // *ACM Transactions on Graphics (TOG) / ACM*. — Vol. 27. — [S. l. : s. n.], 2008. — P. 73.
- [38] Blind motion deblurring from a single image using sparse approximation [Text] / Jian-Feng Cai, Hui Ji, Chaoqiang Liu, Zuowei Shen // *Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on / IEEE*. — [S. l. : s. n.], 2009. — P. 104–111.
- [39] Gürelli, M. I. EVAM: an eigenvector-based algorithm for multichannel blind deconvolution of input colored signals [Text] / Mehmet I. Gürelli, Chrysostomos L. Nikias // *Signal Processing, IEEE Transactions on*. — 1995. — jan. — Vol. 43, no. 1. — P. 134–149. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/78.365293>.
- [40] Multichannel blind deconvolution of the short-exposure astronomical images [Text] / Filip Šroubek, Jan Flusser, Tomáš Suk, Stanislava Šimberová // *Pattern Recognition, 2000. Proceedings. 15th International Conference on*. — Vol. 3. — [S. l.] : IEEE, 2000. — P. 49–52 vol.3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/icpr.2000.903484>.
- [41] Šroubek, F. Multichannel blind iterative image restoration [Text] / Filip Šroubek, Jan Flusser // *Image Processing, IEEE Transactions on*. — 2003. — Vol. 12, no. 9. — P. 1094–1106. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/tip.2003.815260>.
- [42] Katkovnik, V. Frequency domain blind deconvolution in multiframe imaging using anisotropic spatially-adaptive denoising [Text] / V. Katkovnik, D. Paliy. — *Proceedings of EUSIPCO*. — [S. l. : s. n.], 2006.
- [43] Kurup, P. U. An Electronic Nose for Detecting Hazardous Chemicals and Explosives [Text] / Pradeep U. Kurup // *Technologies for Homeland Security, 2008 IEEE Conference on*. — [S. l.] : IEEE, 2008. — may. — P. 144–149. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ths.2008.4534439>.
- [44] Standoff Raman hyperspectral imaging detection of explosives [Text] / R. M. Wentworth, J. Neiss, M. P. Nelson, P. J. Treado // *Antennas and Propagation Society International Symposium, 2007 IEEE*. — [S. l.] : IEEE, 2007. — jun. — P. 4925–4928. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/aps.2007.4396649>.